

EVALUASI PARAMETER DESAIN TERMOHIDROLIKA TERAS DAN SUB KANAL PLTN AP1000 PADA KONDISI TUNAK

Muh. Darwis Isnaini, Sukmanto Dibyo, Suroso, Geni Rina S, Endiah P. Hastuti, Muh. Subekti

Email : darwis@batan.go.id

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) BATAN

Diterima editor 29 November 2011

Disetujui untuk publikasi 19 Januari 2012

ABSTRAK

EVALUASI PARAMETER DESAIN TERMOHIDROLIKA TERAS DAN SUB KANAL PLTN AP1000 PADA KONDISI TUNAK. Telah dilakukan verifikasi dan validasi parameter desain termohidrolika teras PLTN AP1000 pada kondisi *steady state*. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan *computer code* CAUDVAP, COBRA-EN dan RELAP5. Input yang digunakan untuk CAUDVAP adalah data geometri bejana dan teras (elemen bakar, *bypass*, *core barrel* dan selubung teras) dan laju alir total, dengan output penurunan tekanan, distribusi laju alir dan kecepatan pendingin di teras. Input untuk COBRA-EN adalah data geometri elemen bakar, daya linier, laju alir efektif dan sifat termal elemen bakar dengan output adalah penurunan tekanan di teras aktif, distribusi entalpi, temperatur bahan bakar, temperatur kelongsong, temperatur pendingin, fluks kalor, koefisien hantaran kalor dan DNBR. Sedangkan input untuk RELAP5 adalah data geometri batang bahan bakar, fluks panas dan laju alir, dengan output adalah penurunan tekanan sepanjang kanal, temperatur kelongsong dan temperatur pendingin. Dari hasil perhitungan CAUDVAP dan deviasinya terhadap data desain diperoleh penurunan tekanan sepanjang bejana teras sebesar 271,53 kPa (deviasi -1,26%), dengan distribusi laju alir melalui teras aktif sebesar 48.537,9 ton/jam (deviasi 0,19%), melalui *guide thimble* dan *core barrel* sebesar 2944,8 ton/jam (deviasi -3,05%) dan melalui *core shroud* sebesar 283,2 ton/jam (deviasi 9,98%). Perhitungan penurunan tekanan teras aktif dengan CAUDVAP, COBRA-EN dan RELAP5 adalah 76,01 kPa, 73,78 kPa dan 73,3 kPa. Perbedaan ini disebabkan karena perubahan luasan dari bagian penyangga teras ke bagian perangkat bahan bakar tidak diperhitungkan di dalam kode COBRA-EN dan RELAP5. Hasil perhitungan termohidrolika teras (analisis kanal) dengan COBRA-EN diperoleh bahwa temperatur *meat* perangkat bahan bakar berkisar antara 507,95 – 945,45°C, temperatur permukaan kelongsong bahan bakar 302,15 – 338,75°C dan DNBR minimum berkisar 2,23 – 6,07. Adapun analisis subkanal terpanas dengan COBRA-EN dan RELAP5 diperoleh temperatur pendingin keluaran masing-masing diperoleh 329,42 °C (deviasi 1,47%) dan 324,51 °C (deviasi -0,05%), fluks kalor maksimum masing-masing diperoleh 1634,13 kW/m² (deviasi -0,04%) dan 1601,0 kW/m² (deviasi -2,06%). Keseluruhan parameter termohidrolika yang didapat dari hasil perhitungan, dibandingkan dengan data desain menunjukkan tidak adanya perbedaan yang berarti, sehingga dapat disimpulkan bahwa perhitungan menggunakan kode CAUDVAP, COBRA-EN dan RELAP5 tersebut valid.

Kata kunci: Parameter termohidrolika, teras dan sub kanal, AP1000, CAUDVAP, COBRA-EN, RELAP5.

ABSTRACT

EVALUATION OF CORE AND SUB CHANNEL THERMAL-HYDRAULICS DESIGN PARAMETER OF AP1000 NUCLEAR POWER PLANTS ON STEADY STATE CONDITION.

Verification and validation of core thermal-hydraulics parameter design of PWR 1000 nuclear power plants have been carried out. The calculation was done using the computer code CAUDVAP, COBRA-EN and RELAP5. The input data that used for CAUDVAP code are such as vessel and core geometry data (fuel elements, *bypass*, *core barrel* and *core shroud*) and the total flowrate, gave output such as the core and vessel pressure drop, coolant velocity and flowrate distribution in the core. The input data used for COBRA-EN such as the fuel element geometry, linear power, the

effective flowrate and the fuel element thermal properties, and gave the output such as active core and channel pressure drop, the distribution of enthalpy, fuel temperature, cladding temperature, coolant temperature, heat flux, heat transfer coefficient and DNBR. Whereas the input data used for RELAP5 was the fuel rod geometry, heat flux and flowrate, and gave the output such as the pressure drop along the channel, the cladding temperature and coolant temperature. The calculation using CAUDVAP gave results the pressure drop along the core vessel of 271.53 kPa (deviation of -1.26%), the distribution of flowrate through the active core of 48537.9 tons/h (deviation of 0.19%), through the guide thimble and core barrel of 2944.8 ton/h (deviation of -3.05%) and through the core shroud of 283.2 ton/h (deviation of 9.98%). The calculation results of active core pressure drop using CAUDVAP, COBRA-EN and RELAP5 were found 76.01 kPa, 73.78 kPa and 73.3 kPa, respectively. The difference was caused by the change of core lower support area to active core area were not taken into account in calculation using RELAP5 and COBRA-EN codes. The calculated results using COBRA-EN code for core thermal-hydraulics (channel analysis) showed that the maximum meat temperature revolved by 507.95 – 945.45oC, the maximum cladding surface temperature revolved by 302.15 – 338.75oC, and the minimum DNBR revolved by 2.23 – 6.07. Whereas, the hot sub channel analysis using COBRA-EN and RELAP5 codes showed that the fluid outlet temperature were 329.42oC (deviation of 1.47%) and 324.51oC (dev. -0.05%), respectively, and the maximum heat fluxes were 1634.13 kW/m² (dev. -0.04%) and 1601.0 kW/m² (dev. -2.06%), respectively. The overall thermal-hydraulic parameters that obtained from the calculation compared to the design data showed no significant difference, so it could be concluded that the calculation using CAUDVAP, COBRA-EN and RELAP5 codes were valid.

Keywords: Thermal-hydraulic parameters, core and sub channel, AP1000, CAUDVAP, COBRA-EN, RELAP5.

PENDAHULUAN

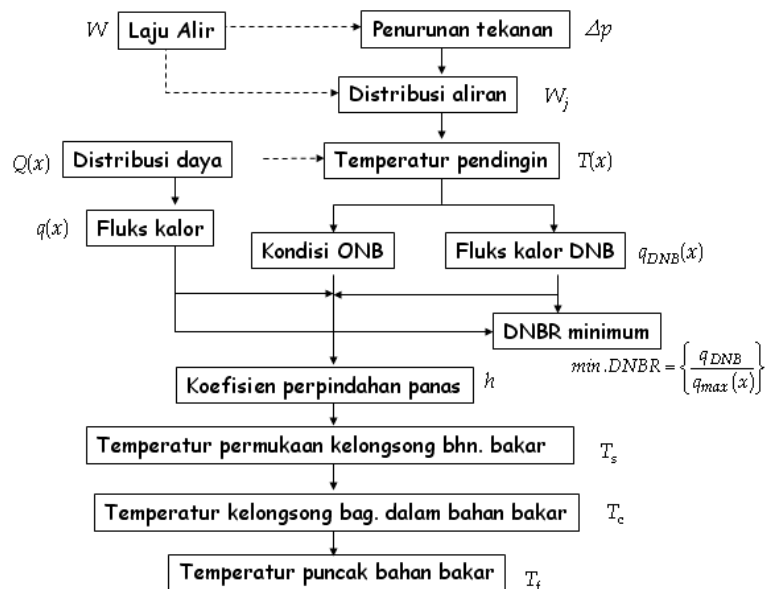
Penguasaan akan pemahaman dan evaluasi desain suatu Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) menjadi tuntutan masyarakat dan pemerintah, jika pemerintah secara sungguh-sungguh ingin membangun dan mengoperasikan PLTN untuk menunjang pemenuhan kebutuhan energi di Indonesia. Dengan diperolehnya hasil evaluasi desain suatu PLTN yang valid, berarti menunjukkan tingkat kualitas sumber daya manusia (SDM) yang handal. Di dalam makalah ini, penelitian hanya dibatasi pada evaluasi parameter desain termohidrolika teras dan sub kanal AP1000. Yang dimaksud dengan parameter desain termohidrolika adalah parameter penurunan tekanan teras, distribusi temperatur pendingin, temperatur kelongsong bahan bakar, temperatur *meat* bahan bakar, fluks kalor, margin keselamatan DNBR dan lain-lain.

Sistem pendingin primer reaktor dari suatu PLTN jenis reaktor air tekan (*Pressurized Water Reactor – PWR*) mempunyai peranan yang sangat penting di dalam pengambilan kalor dari perangkat bahan bakar. Dikarenakan tekanan operasi sistem pendingin primer PLTN PWR sangat tinggi (lebih dari 15 MPa), maka pendingin primer tetap dalam kondisi cair. Pendingin primer yang mempunyai temperatur dan tekanan tinggi tersebut akan dialirkan oleh pompa primer dari bejana tekan reaktor ke sistem pembangkit uap (*Steam Generator – SG*). Di dalam sistem pembangkit uap ini, kalor dari pendingin primer dialirkan untuk mengubah pendingin sekunder menjadi uap, dan uap yang dihasilkan di dalam pembangkit uap tersebut dipakai untuk memutar turbin generator yang menghasilkan listrik.

Tujuan riset ini untuk mendapatkan dokumen teknis hasil validasi parameter desain termohidrolika teras dan sub kanal reaktor AP1000[1] untuk kondisi *steady state*. Metodologi atau langkah-langkah yang dilakukan di dalam analisis/evaluasi desain termohidrolika dan keselamatan reaktor[2] adalah :

- Perhitungan penurunan tekanan dan distribusi laju alir pendingin. Untuk melakukan perhitungan penurunan tekanan di dalam bejana reaktor dan distribusi aliran di dalam teras reaktor digunakan kode CAUDVAP[3] , sedangkan untuk perhitungan penurunan tekanan pada teras aktif (pada perangkat bahan bakar) digunakan kode CAUDVAP, COBRA-EN^[4] dan RELAP5[5,6].
- Perhitungan termohidrolika teras dan termohidrolika sub kanal yang meliputi distribusi daya perangkat bahan bakar, penurunan tekanan, distribusi temperatur bahan bakar (pendingin, kelongsong dan *meat* bahan bakar), fluks panas, kondisi awal pendidihan inti (*Onset Nucleate Bolling-ONB*) dan margin keselamatan atau nilai rasio pelepasan pendidihan inti (*Departure of Nucleate Boiling Ratio – DNBR*). Untuk perhitungan termohidrolika teras digunakan kode COBRA-EN, sedangkan untuk perhitungan termohidrolika sub kanal digunakan kode COBRA-EN dan RELAP5, tetapi kode RELAP5 hanya menampilkan luaran penurunan tekanan, suhu pendingin keluaran sub kanal dan suhu kelongsong.

Beberapa validasi dan penggunaan kode sudah dilakukan antara lain kode CAUDVAP sudah divalidasi dan digunakan untuk analisis laju alir pada *stringer* iradiasi RSG-GAS[7,8], kode COBRA-EN sudah divalidasi dan digunakan untuk analisis termohidrolika sub kanal dan pemetaan distribusi temperatur *meat* bahan bakar AP1000[9,10,11], sedangkan kode RELAP sudah banyak digunakan untuk pengembangan model uji QUEEN-II dan verifikasi model perangkat bahan bakar PWR.[12,13,14] Secara garis besar diagram alir dalam melakukan analisis termohidrolika reaktor secara umum, ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir dalam analisis termohidrolika dan keselamatan reaktor.

Manfaat dari hasil riset ini adalah dapat digunakan untuk menunjukkan jaminan keselamatan operasi reaktor PLTN AP1000 pada kondisi desain operasi normal dan desain transien. Dari hasil ini, maka parameter termohidrolika teras yang terdapat di dalam Bab 4

Laporan Analisis Keselamatan AP1000 dapat terunut dan terverifikasi dengan baik dan valid, sehingga dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan teknis dalam penyusunan penawaran spesifikasi (*Bid Invitation Specification - BIS*) serta memberikan sumbangan dalam litbang energi khususnya mengenai termohidrolika reaktor AP1000 di Indonesia.

DASAR TEORI

Analisis termohidrolika PWR

Karakteristik masing-masing jenis reaktor akan sangat menentukan di dalam pendekatan pemodelan yang digunakan. Susunan batang bahan bakar dikelompokkan secara mekanik menjadi beberapa kesatuan, tiap kesatuan disebut perangkat elemen bakar. Pembuatan perangkat elemen bakar ini bertujuan untuk mempermudah penanganannya (*handling*) di dalam teras. Perangkat bahan bakar dimodelkan sebagai aliran paralel yang terbentuk antara *plenum* bawah dan *plenum* atas. Sebagai kata kunci karakteristik tersebut adalah ada atau tidaknya penyalubung perangkat batang bahan bakar. Setiap perangkat bahan bakar reaktor air didih (BWR) ditutup dengan penyalubung, sehingga terasnya merupakan kumpulan dari kanal aliran paralel yang terisolasi satu dengan yang lain. Sedangkan perangkat bahan bakar reaktor air tekan (PWR) tidak memiliki penyalubung perangkat, sehingga secara hidrolika tidak terpisahkan antara satu perangkat dengan perangkat yang lain, sehingga dimungkinkan terjadi aliran silang antar perangkat (*cross flow*). Secara umum pendekatan untuk analisis termohidrolika teras reaktor daya disajikan pada Tabel 1[15].

Tabel 1. Pendekatan untuk analisis termohidrolika teras reaktor daya.

Jenis Reaktor	Analisis Termohidrolika	
	Dalam teras reaktor (analisis kanal)	Dalam perangkat bahan bakar (analisis sub kanal)
BWR	Terisolasi per kisi perangkat bahan bakar	Saling terhubung antar kisi sub kanal pendingin
PWR	Saling terhubung antar kisi perangkat bahan bakar	Saling terhubung antar kisi sub kanal pendingin

Analisis termohidrolika teras PWR^[15] biasanya dikerjakan dalam dua langkah, yang masing-masing dengan model aliran di dalam banyak kanal yang saling terhubung. Langkah tersebut adalah:

- Analisis kanal (analisis teras). Dalam analisis termohidrolika teras, setiap perangkat bahan bakar dihomogenisasi dan dimodelkan sebagai sebuah kanal yang secara makroskopik mempunyai sifat rerata dari himpunan sub kanal yang dihomogenisasi. Pada model ini teras tersusun atas sejumlah kanal sesuai dengan jumlah perangkat bahan bakarnya. Pada langkah ini, akan diperoleh hasil rerata dan global dari setiap perangkat bahan bakar. Adapun hasil analisis rinci tiap rod bahan bakar dalam satu perangkat harus dilakukan dengan analisis sub kanal.
- Analisis sub kanal. Pada analisis sub kanal biasanya tidak dilakukan untuk seluruh perangkat bahan bakar, tetapi dipilih perangkat yang terpanas yang akan dianalisis lebih lanjut dari langkah pertama, dengan menggunakan kondisi batas lateral di dalam perangkat bahan bakar yang diperoleh dari analisis kanal. Langkah ini dapat dipakai untuk mengidentifikasi kelakuan dari sub kanal terpanas (*hottest sub channel*) dan sub kanal rerata di dalam suatu perangkat bahan bakar.

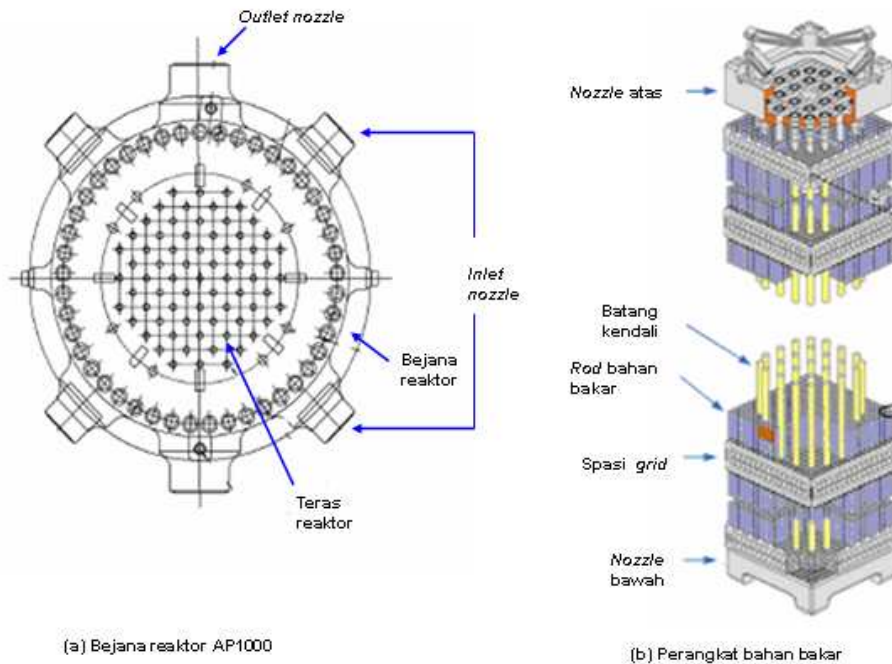
Data teras AP1000

PLTN jenis AP1000 termasuk reaktor PWR buatan Westinghouse yang mempunyai daya termal 3.400 MWt, dan daya listrik terbangkit sekitar 1154 MWe. Reaktor tersebut mempunyai 157 perangkat bahan bakar, dengan *rod* bahan bakar tersusun atas matriks 17 x 17 yang terdiri dari 264 *rod* bahan bakar, 24 tabung pengarah (*guide thimble*) untuk batang kendali, dan 1 tabung pengarah instrumentasi. Data spesifikasi teknis dari AP1000-EU disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data desain AP1000[1]

Tipe PLTN	AP1000
Desainer / Vendor	Westinghouse
Daya Termal (MW)	3400
Laju alir desain termal (kg/jam)	51,4827 x 10 ⁶
Laju alir efektif (kg/jam)	48,4437 x 10 ⁶
Tekanan operasi (MPa)	15,513
Temperatur <i>inlet</i> pendingin (°C)	279,44
Temperatur <i>outlet</i> pendingin (°C)	324,66
Penurunan tekanan teras (kPa)	275,0
Diameter teras (cm)	304,04
Tinggi teras (cm)	426,72
Desain perangkat b. Bakar	
Jumlah perangkat b.b.	157
Tipe	17 x 17
Ukuran perangkat (cm x cm)	21,40 x 21,40
Jumlah <i>rod</i> / perangkat	264
Jarak antar pusat <i>rod</i> (cm)	1,26
Diameter <i>rod</i> (cm)	0,950
Diameter pelet (cm)	0,819
Fluks kalor rerata (kW/m ²)	628,71
Fluks kalor maks (kW/m ²)	1634,71

Pada Gambar 2 ditunjukkan gambar bejana reaktor dan perangkat bahan bakar AP1000.



Gambar 2. Gambar dari (a) Bejana reaktor AP1000 (b) Perangkat bahan bakar [1].

Di dalam pengoperasian suatu PLTN, harus selalu dipastikan bahwa instalasi tersebut dapat beroperasi dengan selamat baik pada kondisi tunak (*steady-state*) maupun dalam kondisi transien. Pada reaktor PLTN PWR, pada umumnya batasan operasi reaktor dikatakan selamat apabila temperatur *meat* bahan bakar pada kondisi terburuk sekitar 30% berada di bawah temperatur lelehnya 2594°C dan DNBR minimum lebih dari 2,80. Konsekwensi dari persyaratan pengoperasian tersebut diperlukan laju alir pendingin dan tekanan operasi yang memadai, sehingga batasan tersebut tidak terlampaui.

Kode CAUDVAP

Kode (program komputer) CAUDVAP v2.60 adalah suatu program yang dikembangkan oleh Nuclear Engineering Division, INVAP SE, Argentina, yang dipakai untuk menghitung distribusi laju alir dan penurunan tekanan di dalam teras reaktor. Program ini dapat menghitung distribusi kecepatan pendingin pada rejim tunak yang melalui kanal-kanal yang berbeda yang dihubungkan secara paralel antara plenum masukan dan plenum keluaran, dengan batasan bahwa tekanan antara dua kanal bagian masukan atau keluaran hanya disebabkan oleh gaya hidrostatik.

Asumsi yang dipakai di dalam kode CAUDVAP untuk menyederhanakan masalah adalah :

- Variasi densitas pendingin sepanjang kanal sangat kecil memberikan efek yang signifikan pada penurunan tekanan
- Hanya penurunan tekanan akibat gesekan (friksi) yang tergantung pada kekentalan (viskositas)

- Beda tekanan pada masukan (*inlet*) dari kanal-kanal yang berbeda letak ketinggiannya hanya disebabkan oleh gaya hidrostatika.

Input yang digunakan untuk CAUDVAP adalah data geometri bejana dan teras (elemen bakar, *bypass*, *core barrel* dan selubung teras) dan laju alir total, dengan output penurunan tekanan, distribusi laju alir dan kecepatan pendingin di teras.

Kode COBRA-EN

Kode COBRA-EN adalah kode untuk menganalisis termohidrolika teras dan perangkat bahan bakar nuklir berbentuk silinder (*rod bundle*) untuk menghitung distribusi entalpi, aliran, temperatur dan batas keselamatan terhadap pelepasan pendidihan inti (*departure from nucleate boiling – DNB*) di dalam perangkat bahan bakar dan teras baik untuk kondisi tunak (*steady state*) dan transien. Program COBRA menggunakan konsep dasar analisis sub kanal, di mana perangkat bahan bakar atau teras reaktor dibagi dalam beberapa sub kanal yang mempunyai batasan-batasan yang didefinisikan oleh permukaan bahan bakar sebelahnya. Sub kanal secara aksial dibagi menjadi beberapa volume kontrol yang diskrit dimana persamaan konservasi massa, energi dan momentum digunakan di dalamnya, dan variabel laju aliran massa, tekanan, entalpi dan densitas didefinisikan sebagai harga rata-rata secara volume. Keluaran dari perhitungan dengan menggunakan kode COBRA-EN antara lain distribusi penurunan tekanan dalam kanal, distribusi temperatur pendingin, kelongsong dan meat bahan bakar, fluks panas, besar hantaran panas dan DNBR.

Input untuk COBRA-EN adalah data geometri elemen bakar (bahan bakar dan kelongsong), daya linier, laju alir efektif, temperatur pendingin masukan ke teras dan sifat termal elemen bakar (konduktivitas termal dan panas spesifik). Adapun outputnya adalah penurunan tekanan di teras aktif, distribusi entalpi, distribusi laju alir pendingin ke kanal, temperatur bahan bakar, temperatur kelongsong, temperatur pendingin, fluks panas, koefisien hantaran panas dan DNBR.

Kode RELAP5

Kode RELAP5 adalah program komputer yang dapat digunakan untuk melakukan simulasi atau analisis pada kondisi tunak maupun transien pendingin air pada suatu sistem kanal, hidrodinamika reaktor nuklir maupun non nuklir. Pada kode ini, dikembangkan dari model node dan *junction multi-dimensional* termal-hidrolika, perpindahan kalor, komponen alat, sistem kontrol dan model lainnya untuk mendiskripsikan watak yang kompleks pada kondisi 1 maupun 2 fasa. Bagian utama terdiri dari bagian hidrodinamika, struktur kalor dan kinetika reaktor. Bagian utama hidrodinamika dapat berupa kanal, percabangan dan sebagainya. Struktur kalor terdapat pada komponen pembangkit kalor maupun bagian yang terjadi perpindahan kalor, bagian ini dihubungkan dengan volum hidrodinamika. Komponen hidrodinamika diselesaikan dengan persamaan satu dimensi untuk fluida satu fasa maupun aliran dua fasa (air dan uap air).

Input untuk RELAP5 adalah data geometri rod bahan bakar, fluks panas dan laju alir, dengan output perhitungan adalah penurunan tekanan sepanjang kanal, temperatur kelongsong dan temperatur pendingin.

METODOLOGI

Evaluasi parameter desain termohidrolika AP1000 ini dilakukan untuk kondisi operasi tunak (*steady state*) meliputi pemodelan, perhitungan, analisis dan perbandingan. Adapun kegiatan perhitungan yang dilakukan antara lain:

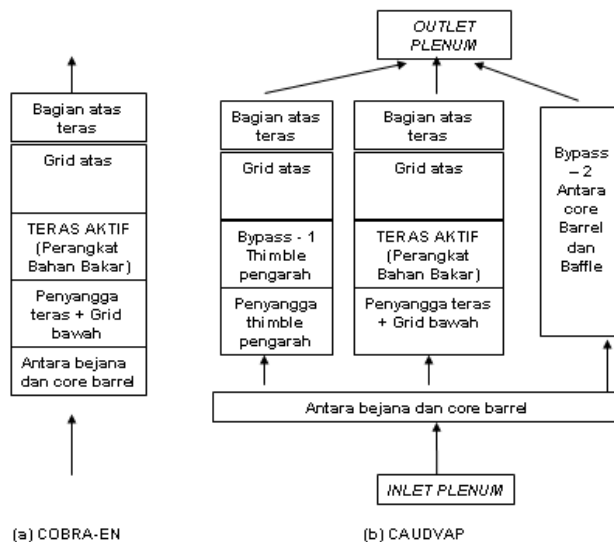
- Perhitungan distribusi aliran dan penurunan tekanan teras dan kanal aktif
- Perhitungan termohidrolika teras (analisis kanal), meliputi distribusi temperatur *meat* bahan bakar, kelongsong dan pendingin, distribusi fluks panas dan DNBR
- Perhitungan termohidrolika subkanal dalam $\frac{1}{2}$ perangkat bahan bakar, meliputi distribusi temperatur *meat* bahan bakar, kelongsong dan pendingin, distribusi fluks panas dan DNBR.

Untuk perhitungan penurunan tekanan digunakan kode COBRA-EN, CAUDVAP dan RELAP5, untuk perhitungan termohidrolika teras hanya digunakan kode COBRA-EN, sedangkan untuk perhitungan termohidrolika sub kanal (perangkat bahan bakar) digunakan kode COBRA-EN dan RELAP5. Pada validasi penurunan tekanan teras dan perhitungan termohidrolika teras dan sub kanal digunakan data laju alir desain termal bejana (*vessel thermal design flow rate – TDF*).

Perhitungan Distribusi Laju alir dan Penurunan Tekanan Teras dan Kanal Aktif AP1000

Untuk dapat menghitung distribusi laju alir dan penurunan tekanan di dalam teras AP1000, maka harus dicari data tentang jenis elemen, jumlah dan ukuran geometri dari masing-masing elemen teras. Pada AP1000, laju alir (*flow rate*) pendingin dibedakan menjadi dua yaitu laju alir pendingin teras aktif (aliran pendingin untuk mendinginkan 157 perangkat x 264 *rod* = 41.448 batang bahan bakar) dan laju alir *bypass* (aliran pendingin untuk mendinginkan 157 perangkat x 25 *thimble* pengarah (*guide thimble*) = 3.925 *thimble* pengarah dan 1 selubung teras (*core barrel*)). Perhitungan dilakukan dengan menggunakan kode COBRA-EN dan CAUDVAP.

Kode COBRA-EN merupakan kode termohidrolik yang dipakai untuk perhitungan distribusi temperatur *meat* bahan bakar, kelongsong dan pendingin, serta distribusi fluks panas, penurunan tekanan sepanjang kanal pendingin dan DNBR. Kode COBRA-EN mempunyai keterbatasan antara lain hanya untuk perhitungan teras aktif, tidak mampu menganalisis adanya belokan aliran dan perubahan geometri aliran. Oleh karena itu pemodelan kanal aliran pendingin hanya dilakukan pada luasan kanal aliran untuk pendinginan *rod* bahan bakar saja, dengan ukuran sepanjang bejana reaktor, ring distribusi aliran, penyangga teras (*core support*), teras aktif (perangkat bahan bakar) dan bagian atas perangkat (*upper plenum*).



Gambar 3. Perbandingan model perhitungan *pressure drop* teras AP1000: (a) Model untuk COBRA-EN dan (b) Model untuk CAUDVAP

Perhitungan termohidrolika teras (analisis kanal) dengan kode COBRA-EN.

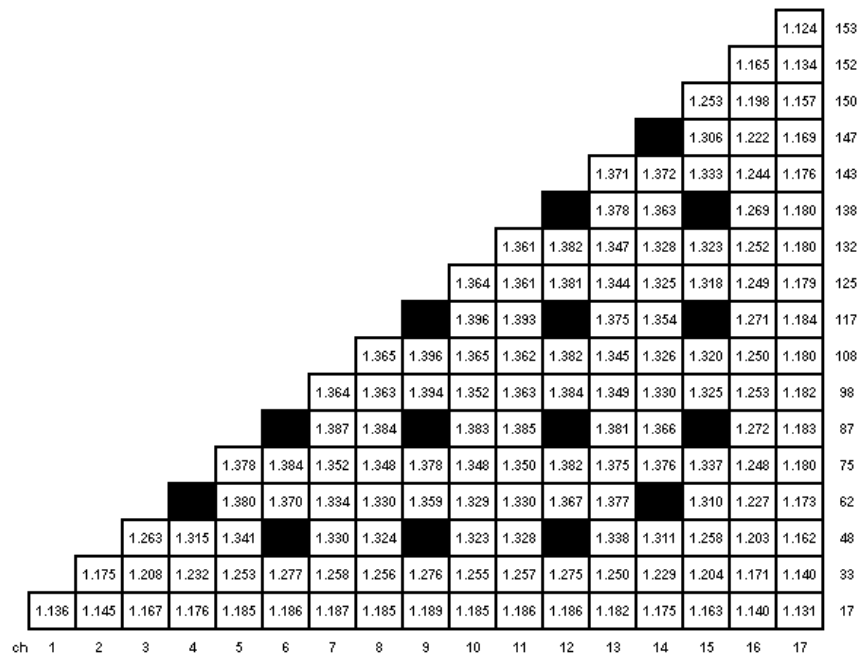
Dari susunan teras AP-1000 yang terdiri dari 157 perangkat bahan bakar, diambil 1/8 teras (26 perangkat) sebagai model perhitungan dengan kode COBRA-EN, dengan tiap perangkat dimodelkan menjadi satu kanal seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.

				15	20		
				0.859	0.630		
			10	14	19	24	
			1.193	1.033	1.041	0.561	
		6	9	13	18	23	
		1.250	1.111	1.203	1.026	0.815	
	3	5	8	12	17	22	26
	1.273	1.142	1.250	1.113	1.168	0.913	0.436
1	2	4	7	11	16	21	25
1.279	1.154	1.268	1.137	1.254	1.161	0.957	0.541

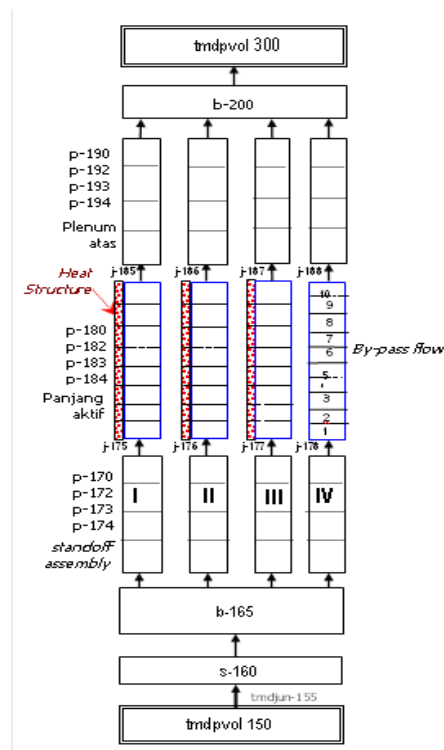
Gambar 4. Model perhitungan 1/8 teras dengan kode COBRA-EN untuk model distribusi rapat daya ternormalisasi, awal siklus, batang kendali terangkat, daya panas penuh, tanpa xenon.

Perhitungan termohidrolika sub kanal dari 1/2 perangkat bahan bakar AP-1000

Sebagai bahan perhitungan, dipilih satu perangkat bahan bakar di posisi G-9 untuk reaktor AP1000-EU dengan variasi faktor daya (F_Q) antara 1,124 – 1,396.



Gambar 5. Model $\frac{1}{2}$ perangkat bahan bakar yang terdiri atas 153 batang bahan bakar



Gambar 6. Nodalisasi model sub-kanal di dalam perangkat bahan bakar.

Perhitungan termohidrolika sub kanal di dalam perangkat bahan bakar dengan menggunakan kode COBRA-EN dapat langsung menggunakan model di dalam Gambar 5, sedangkan dengan kode RELAP5 harus dimodelkan seperti Gambar 6.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi Dan Analisis Distribusi Laju Alir Dan Penurunan Tekanan Teras

Hasil evaluasi distribusi laju alir dan penurunan tekanan teras AP1000 untuk masing-masing kode disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Verifikasi data DCD AP1000 dengan hasil perhitungan menggunakan kode CAUVAP dan COBRA-EN

	DCD AP1000		CAUDVAP		COBRA-EN	
	ton/jam	%	ton/jam	%	ton/jam	%
Data masukan:						
Laju alir primer	51.482,7	100%	51.482,7	100%	51.482,7	100%
Hasil perhitungan :						
• Laju alir teras aktif	48.443,7	94,1%	48.537,9	94,28%	51.482,7	100%
• Laju alir <i>bypass</i>	3037,5	5,9%	2944,8	5,72%	0	0%
○ Laju alir <i>guide thimble, core barrel dan lain-lain</i>	2780,1	5,4%	2661,6	5,17%	0	0%
○ Laju alir <i>core shroud</i>	257,4	0,5%	283,2	0,55%	0	0%
• Penurunan tekanan (<i>pressure drop</i>) teras (kPa)	275		271,53 (dev. -1,26%)		233,01 (dev. -15,27%)	
• Penurunan tekanan sepanjang bahan bakar aktif (kPa)	--		79,34		78,92	

Dari Tabel 3 terlihat bahwa verifikasi distribusi laju alir dan penurunan tekanan pada reaktor AP1000 dengan menggunakan kode CAUDVAP pada data laju alir desain termal bejana (*vessel thermal design flow rate – TDF*) sebesar 51.482,7 ton/jam menunjukkan bahwa laju alir teras aktif (*effective flow rate for heat transfer*) sebesar 48.537,9 ton/jam (deviasi 0,19%), laju alir *guide thimble, core barrel* sebesar 2944,8 ton/jam (deviasi -3,05%) laju alir *core shroud* sebesar 283,2 ton/jam (deviasi 9,98%) dan penurunan tekanan teras sebesar 271,53 kPa (deviasi -1,26%). Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa pemodelan dan hasil perhitungan dengan kode CAUDVAP sudah valid, dan data Dokumen Kendali Desain (*Design Control Document – DCD*) AP1000 sudah terverifikasi dengan baik.

Berbeda dengan kode CAUDVAP yang mampu untuk pemodelan bagian-bagian teras dengan luasan dan panjang masing-masing, pada perhitungan dengan kode COBRA-EN, hanya memberikan laju alir teras aktif saja, dikarenakan di dalam pemodelan dengan kode COBRA-EN hanya dibuat model kanal untuk perangkat bahan bakar dengan panjang jumlahan dari panjang selubung teras, bagian penyangga teras, bagian bahan bakar aktif, bagian pemegang atas perangkat dan tidak mampu untuk memodelkan bagian *core shroud, core barrel* dan sebagainya. Dari hasil perhitungan penurunan tekanan teras AP1000 dengan kode COBRA-EN diperoleh sebesar 233,01 kPa atau deviasi sebesar -15,27%.

Adapun perhitungan penurunan tekanan untuk bagian teras aktif saja (bagian perangkat bahan bakar) pada laju alir efektif untuk perpindahan panas (*effective flow rate for heat transfer*) sebesar 48.443,7 ton/jam atau sebesar 94,1% laju alir total, dengan menggunakan kode CAUDVAP, COBRA-EN dan RELAP5 ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perhitungan penurunan tekanan bagian teras aktif dengan menggunakan kode CAUDVAP, COBRA-EN dan RELAP5.

	DCD AP1000	CAUDVAP	COBRA-EN	RELAP-5
Laju alir teras aktif, ton/jam	48.443,7	48.443,7	48.443,7	48.443,7
Penurunan tekanan (<i>pressure drop</i>) teras aktif, kPa	--	76,01	73,78	73,3

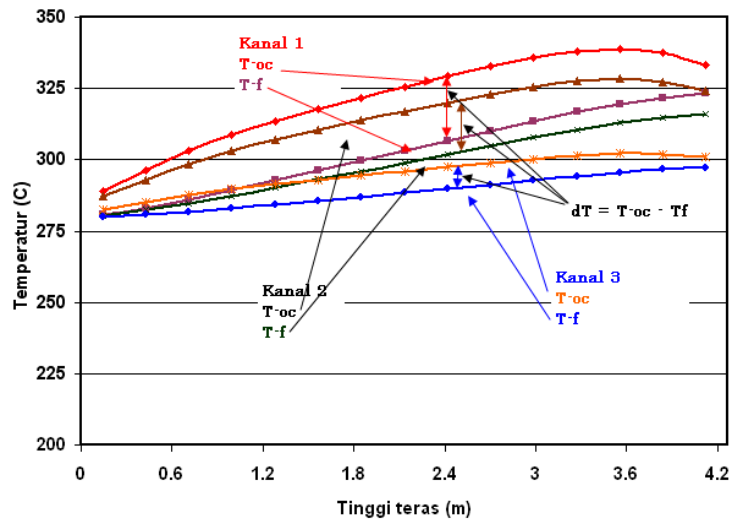
Dari Tabel 4 terlihat bahwa penurunan tekanan pada bagian teras aktif dengan menggunakan kode CAUDVAP, COBRA-EN dan RELAP5 diperoleh masing-masing sebesar 76,01 kPa, 73,77 kPa dan 73,3 kPa. Dibanding dengan hasil perhitungan kode CAUDVAP, maka hasil perhitungan COBRA-EN dan RELAP5 masing-masing diperoleh perbedaan -2,95% dan -3,57%, sedangkan antara COBRA-EN dan RELAP5 ada perbedaan -0,64%. Perbedaan hasil perhitungan dengan kode CAUDVAP dengan COBRA-EN dan RELAP5 disebabkan di dalam kode CAUDVAP terdapat perhitungan penurunan tekanan yang disebabkan adanya perubahan luasan kanal dari bagian penyangga teras ke bagian perangkat bahan bakar, di mana di dalam kode COBRA-EN dan RELAP5 hanya memperhitungkan penurunan tekanan di bagian perangkat saja.

Analisis Termohidrolika Teras AP-1000 Kondisi Tunak

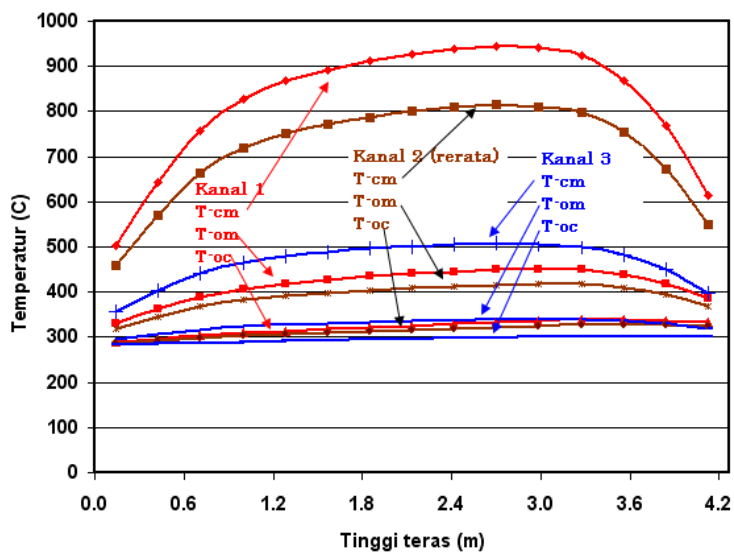
Hasil perhitungan termohidrolika teras AP1000 dengan menggunakan kode COBRA-EN pada kondisi tunak dengan mengambil perbandingan untuk perangkat bahan bakar terpanas (kanal 1 dengan FR = 1,279), perangkat bahan bakar rerata (kanal 2 dengan FR = 1,03) dan perangkat bahan bakar terdingin (kanal 3 dengan FR = 0,456), ditunjukkan pada Tabel 5 dan Gambar 6 dan 7.

Tabel 5. Perbandingan hasil termohidrolika teras AP1000 dari perangkat bahan bakar terpanas

Parameter	Kanal 1 (terpanas)		Kanal 2 (rerata)	Kanal 3 (terdingin)	
	Nilai	Dev. %	Nilai	Nilai	Dev. %
Temperatur T (°C)					
• T tengah <i>meat</i> maks	945,45	16,01	814,45	507,95	-37,67
• T <i>meat</i> bag. luar, maks	451,05	7,87	418,15	339,75	-18,75
• T <i>clad</i> bag. dalam, maks	362,75	4,43	347,35	309,95	-10,77
• T <i>clad</i> bag. luar, maks	338,75	3,17	328,35	302,15	-7,98
• T pendingin keluaran	323,22	2,27	316,05	297,30	-5,93
<i>Pressure drop</i> sepanjang teras aktif (kPa)	73,80	0,03	73,78	73,76	-0,03
Kecep. Massa (kg/m ² .s)	3430,9	-0,73	3457,7	3504,4	1,35
Fluks panas maks (kW/m ²)	803,87	24,66	644,85	274,03	-57,50
DNBR min	2,23	-18,62	2,75	6,07	120,98



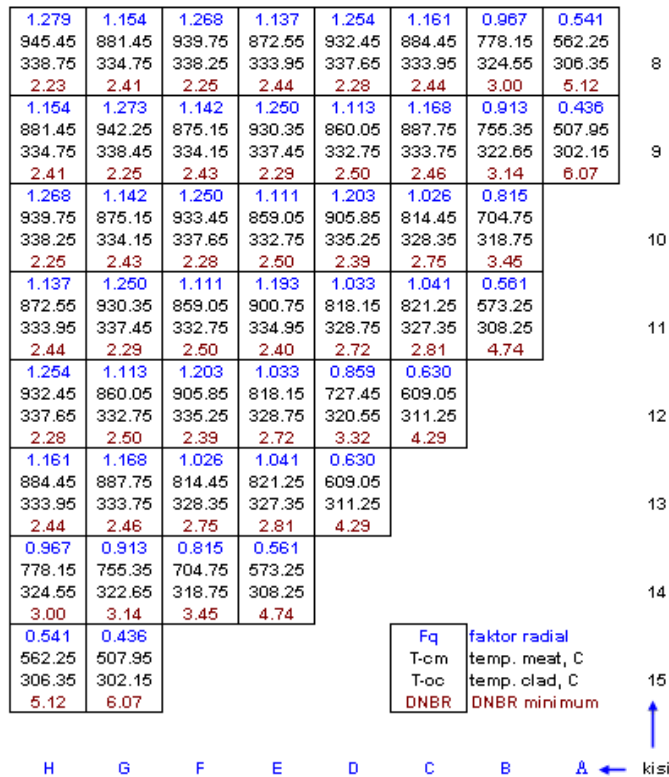
Gambar 7. (a) Distribusi temperatur pendingin sepanjang teras rerata dan (b) Distribusi temperatur kelongsong, temperatur tengah meat dan DNBR pada teras AP-1000 dengan kode COBRA-EN.



Gambar 8. Perbandingan temperatur tengah *meat* (T-cm), temperatur *meat* bagian luar, dan temperaturkelongsong luar (T-oc) dari perangkat bahan bakar terpanas

Dari Tabel 5 dan Gambar 7 dan 8, menunjukkan bahwa dibandingkan dengan perangkat bahan bakar rerata maka temperatur tengah meat maksimum perangkat terpanas bernilai 16,01% lebih besar dari rerata, sedangkan untuk perangkat terdingin lebih kecil 37,67%, demikian juga dengan temperatur kelongsong bagian luarnya, maka temperatur kelongsong maksimum untuk perangkat terpanas lebih besar 3,17% sedangkan untuk

perangkat terdingin lebih rendah 7,98% dibanding temperatur kelongsong perangkat rata-rata. Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa temperatur terpanas dari *meat* dan kelongsong memiliki deviasi tidak terlalu besar dengan temperatur rerata, dibanding deviasi temperatur terdingin dengan temperatur rerata yang besarnya 2,35 kali deviasi temperatur panas ke temperatur rerata.



Gambar 9. Peta distribusi faktor radial, temperatur tengah meat, temperatur kelongsong luar dan DNBR minimum dari ¼ teras AP1000.

Dari hasil analisis termohidrolika teras menggunakan kode COBRA-EN, dibuat gambar peta distribusi faktor radial, tempeatur tengah meat, temperatur kelongsong bagian luar dan DNBR minimum yang ditunjukkan pada Gambar 9. Dari gambar di atas di mana distribusi faktor radial perangkat berkisar antara 0,436 – 1,279, diperoleh bahwa temperatur *meat* maksimum perangkat bahan bakar berkisar antara 507,95 – 945,45°C, temperatur permukaan kelongsong bahan bakar berkisar 302,15 – 338,75°C dan DNBR minimum berkisar 2,23 – 6,07, di mana perangkat bahan bakar posisi (kisi) H-8 merupakan perangkat terpanas (faktor radial 1,279) diperoleh temperatur tengah meat sebesar 945,5°C, temperatur kelongsong luar sebesar 338,75°C, dan DNBR minimum sebesar 2,23. DNBR minimum hasil perhitungan ini berbeda nilainya dengan kriteria keselamatan AP1000, dikarenakan oleh perbedaan korelasi DNBR yang digunakan, di dalam perhitungan dengan kode COBRA-EN digunakan korelasi W-3, sedangkan di dalam desain AP1000 digunakan korelasi WRB-2M. Adapun kriteria keselamatan DNBR dengan menggunakan korelasi W-3 untuk tekanan sistem lebih besar dari 6,895 MPa adalah 1,30^[1].

Analisis Termohidrolika Perangkat Bahan Bakar Dengan Kode COBRA-EN dan RELAP5.

Perbandingan analisis termohidrolika pada perangkat bahan bakar AP1000 menggunakan kode COBRA-EN (model ½ perangkat atau 153 rod bahan bakar) dan kode RELAP5 (model 3 kelompok dari 153 rod bahan bakar) untuk subkanal terpanas (faktor radial FR = 2,60) dari perangkat bahan bakar AP1000 pada daya nominal, ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Validasi data desain AP1000 dengan menggunakan kode COBRA-EN dan RELAP5 dengan temperatur masukan pendingin 279,44°C

	AP1000		
	Desain	COBRA-EN	RELAP5
F_Q	2,60	2,60	2,60
Temperatur T (°C)			
• T tengah <i>meat</i> maks	-	1591,65	-
• T <i>meat</i> bag. luar, maks	-	583,55	-
• T <i>clad</i> bag. dalam, maks	-	392,85	-
• T <i>clad</i> bag. luar, maks	-	348,65	576,85
• T pendingin keluaran	324,66	329,42 (1,47%)	324,51(-0,05%)
Laju alir (kg/s)	0,30	0,30 (0,0%)	0,30 (0,0%)
Fluks kalor q'' (kW/m ²)			
• rerata	628,71	628,51 (-0,03%)	-
• maksimum	1634,71	1634,13 (-0,04%)	1601,0 (-2,06%)
Koef.hantaran panas h (W/m ² .K)	-	61,281	-
Pressure drop (kPa)			
• Sepanjang teras	275	233,01 (-15,27%)	--
• Sepanjang bahan bakar aktif	--	73,78	73,3
DNBR min	2,80	2,418 (-13,54%)	-

Jika dibandingkan hasil perhitungan dengan kode COBRA-EN dan RELAP5 terhadap data desain AP1000, diperoleh bahwa :

- o Parameter desain yang divalidasi dengan kode COBRA-EN lebih lengkap dibanding kode RELAP5,
- o Dari hasil perhitungan temperatur pendingin keluaran dengan menggunakan kode COBRA-EN dan RELAP-5 masing-masing diperoleh 329,42 °C (deviasi 1,47%) dan 324,51 °C (-0,05%). Dari kedua hasil tersebut diperoleh deviasi dalam rentang $\pm 1,5\%$.
- o Dari hasil perhitungan fluks panas maksimum dengan menggunakan kode COBRA-EN dan RELAP-5 masing-masing diperoleh 1634,13 kW/m² (deviasi -0,04%) dan 1601,0 kW/m² (-2,06%). Dari dua hasil tersebut diperoleh deviasi dalam rentang kurang dari 2,1%.
- o Hasil perhitungan temperatur kelongsong luar maksimum dengan menggunakan kode COBRA-EN dan RELAP-5 masing-masing diperoleh 348,65 °C dan 576,85 °C (65,45% lebih besar dibanding COBRA-EN).
- o Adapun DNBR minimum dengan menggunakan kode COBRA-EN diperoleh 2,418 (deviasi -13,54%). Hal ini disebabkan korelasi DNBR yang digunakan di dalam kode COBRA-EN adalah korelasi W-3, sedangkan korelasi DNBR untuk desain adalah

korelasi WRB-2M. Kriteria keselamatan DNBR dengan menggunakan korelasi W-3 untuk tekanan sistem lebih besar dari 6,895 MPa adalah 1,30^[1].

- Dari hasil tersebut diperoleh deviasi temperatur keluaran pendingin, laju alir dan fluks panas maksimum dari kedua kode terhadap data desain berkisar sekitar 2,1%. Hal ini menunjukkan bahwa kedua model perhitungan subkanal dengan kode COBRA-EN dan RELAP5 sudah valid.

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan distribusi laju alir teras menggunakan kode CAUDVAP diperoleh laju alir teras aktif sebesar 94,28% (deviasi 0,19%), laju alir *guide themble* dan *core barrel* sebesar 5,72% (dev. -3,05%) dan laju alir *core shroud* sebesar 0,55% (dev. 9,98%), hasil perhitungan penurunan tekanan (*pressure drop*) teras dengan menggunakan kode CAUDVAP diperoleh 271,53 kPa dan dengan kode COBRA-EN diperoleh 233,01 kPa, atau diperoleh perbedaan terhadap data desain AP1000 masing-masing sebesar -1,26% dan -15,27%. Adapun hasil perhitungan penurunan tekanan sepanjang bahan bakar aktif dengan menggunakan kode CAUDVAP, COBRA-EN dan RELAP5 diperoleh masing-masing sebesar 76,01, 73,78 dan 73,3 kPa.

Hasil perhitungan termohidrolika teras (analisis kanal) AP1000 dengan menggunakan kode COBRA-EN menunjukkan bahwa temperatur *meat* perangkat bahan bakar berkisar antara 507,95 – 945,45°C, temperatur permukaan kelongsong bahan bakar berkisar 302,15 – 338,75°C dan DNBR minimum korelasi W-3 berkisar 2,23 – 6,07, lebih konservatif dibandingkan dengan DNBR minimum korelasi WRB-2M sebesar 2,80. Dalam analisis subkanal terpanas dengan menggunakan kode COBRA-EN dan RELAP5 untuk temperatur pendingin keluaran masing-masing diperoleh 329,42 °C (deviasi 1,47%) dan 324,51 °C (-0,05%) dan fluks panas maksimum masing-masing diperoleh 1634,13 kW/m² (deviasi -0,04%) dan 1601,0 kW/m² (-2,06%).

Dari hasil evaluasi terhadap parameter desain termohidrolika, menunjukkan bahwa perhitungan menggunakan kode CAUDVAP, COBRA-EN dan RELAP5 sudah valid.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih ditujukan kepada KNRT dan semua pihak yang membantu penelitian dapat dikerjakan. Penelitian ini adalah bagian dari penelitian yang dibiayai oleh Program insentif Peningkatan Kesejahteraan Peneliti dan Perekayasa PI-PKPP) Ristek dengan judul “Verifikasi dan Validasi Parameter Desain Termohidrolika Teras PLTN PWR 1000” Tahun 2011.

DAFTAR PUSTAKA

1. AP1000 European Design Control Document, EPS-GW-GL-700 Revision 1: Westinghouse; 2009. Chapter 4 Reactor, p. 4.4-38. Available from : http://www.ukap1000application.com/doc_pdf_library.aspx. Accessed March 8, 2010.

2. Mishima K., Thermal-Hydraulics and Safety Analysis of Research Reactor, Academic Lecture. FNCA Workshop on Research Reactor Utilization and Open Symposium, September 7-10, 2009; Hachinohe. Japan: NSRA; 2009.
3. Pablo Abate, Sergio Paredes. CAUDVAP v2.60: A Computer Program for the Calculus of Flow Distribution and Pressure Drop in Reactor Core. Argentina: Division Ingenieria Nuclear-INVAP; Printed 1996.
4. Basile D. COBRA-EN: Code system for themal-hydraulics transient analysis of light water reactor fuel assemblies and cores. US DOE: Radiation Safety Information Computational Center; Printed 2010.
5. RELAP5 Code Development Team. RELAP5/MOD3: Code Manual, User Guide and Input Requirements, NUREG/CR-5535-V2. Washington DC: Idaho National Engineering Laboratory; 1995.
6. Kundo Misaya. Practical Work of Relap5 Analysis. Japan: NSRA; 2008.
7. Darwis Isnaini M. Penelitian dan Pengembangan Karakteristik Termohidrolika Teras RSG-GAS. Presentasi Ilmiah Jenjang Peneliti Madya; 19 Agustus 2004; Jakarta, Indonesia. Serpong: P2TRR – BATAN; 2004.
8. Darwis Isnaini M. Analisis pada Laju Alir Stringer RSG-GAS. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega, Vol. 5, No. 1, Pebruari 2003. P2TRR-BATAN; 2003. p.23-38
9. Darwis Isnaini M. Verifikasi desain geometri rod bahan bakar PWR1000 Tipikal buatan Mitsubishi dan Westinghouse. Prosiding Seminar Nasional TKPFN ke-16, 28 Juli 2010; Surabaya, Indonesia. Tangerang, PTRKN-BATAN; 2010. p.203-210.
10. Darwis Isnaini M. Perbandingan Desain Termohidrolika Sub-Kanal AP1000-E Dan PWR1000 Tipikal. Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir, 5 Agustus 2010; Jakarta Indonesia. Jakarta, BAPETEN; 2010. p.284-294
11. Darwis Isnaini M. Pemetaan distribusi suhu dan DNBR pada perangkat bahan bakar AP1000-EU. Jurnal Teknologi Reaktor Tri Dasa Mega, Vol. 12, No. 2, Juni 2010. PTRKN-BATAN; 2010. p.103-113.
12. Dibyo S., Susyadi, Juarsa M., Suroso. Validasi Pemodelan Test Section QUEEN-II menggunakan RELAP5. Prosiding Seminar Nasional TKPFN ke-16, 28 Juli 2010; Surabaya, Indonesia. Tangerang, PTRKN-BATAN; 2010. p.59-68.
13. Sukmanto Dibyo, Darwis Isnaini M. Verifikasi model perangkat bahan bakar Reaktor PWR-1000. Prosiding Seminar TKPFN-17, 1 Oktober 2011; Yogyakarta, Indonesia. Tangerang, PTRKN-BATAN; 2011. p.385-395.
14. Suroso, Sukmanto Dibyo, Darwis Isnaini M. Evaluasi perbandingan kinerja termohidrolika sub-kanal teras PWR 1000 tipikal dengan AP-1000. Prosiding Seminar TKPFN-17, 1 Oktober 2011; Yogyakarta, Indonesia. Tangerang, PTRKN-BATAN; 2011. p.396-405.
15. Todreas N, Kazimi MS. Nuclear Systems II: Elements of Thermal Hydraulic Design. USA: Hemisphere Publishing Corporation; 1990.